

Tomographie 3D transitoire de température par photoréflexivité Tera Hertz

Christophe Pradere*, Jean Pascal Caumes, Sabri Benkhemis, Elena Palomo, Jean Christophe Batsale

I2M, Département TREFLE, UMR CNRS 5295 – site ENSAM Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France.

*(auteur correspondant : christophe.pradere@ensam.eu)

Résumé - L'objet de ce travail est la mise au point d'une méthode de tomographie thermique pour la mesure de champs de températures 3D transitoire dans le volume de matériaux et ou objets. Cette nouvelle méthode est basée sur le couplage de la photoréflexivité THz et la mesure d'un champ de température par thermographie IR. L'idée est simple, elle consiste à éclairer un objet qui subit une variation de température par un faisceau THz incident modulé et à mesurer la variation d'amplitude de ce même faisceau transmis ou réfléchi à l'aide d'un capteur thermique associé à un système de thermoconversion. L'originalité réside dans le caractère très « traversant » du THz vis-à-vis de nombreux matériaux opaques à d'autres longueurs d'ondes comme le visible ou l'infrarouge. Ainsi, il devient notamment possible par cette technique d'imager un champ de température d'un objet situé derrière des matériaux comme le béton, le bois, les plastiques.

Nomenclature

R réflectivité
 T température, K

Symboles grecs

κ coefficient de réflectivité, K^{-1}

Indices et exposants

0 ambiante

1. Introduction

Depuis quelques années, deux principales techniques sont utilisées pour réaliser la mesure de champ de température de matériaux hétérogènes. La première catégorie utilise la microscopie photoréflexive [1-6], alors que la seconde est plutôt basée sur l'émission propre via des mesures par thermographie InfraRouge [7-12]. Le principal avantage de la photo réflectivité réside dans la très bonne résolution spatiale qui est directement liée à la longueur d'onde du faisceau sonde. De même, cette technique basée sur des excitations laser très haute fréquence (> 1 MHz) présente l'avantage de pouvoir moyenniser tout en bénéficiant de constante de temps faible les signaux. Cependant, cette technique basée sur la variation du coefficient de réflectivité d'un échantillon en fonction de la variation de température, elle s'applique avantageusement à des matériaux très réfléchissants (métaux..) ou sur lesquels une couche réfléchissante est déposée au préalable. Afin de réaliser la mesure, une caméra CCD ou une simple photodiode est utilisée pour mesurer l'onde réfléchi à la surface de l'échantillon. Cette onde incidente pouvant être ponctuelle (type laser focalisé) ou uniformément répartie sur la surface (lumière blanche collimatée). La deuxième méthode, plus simple à mettre en œuvre consiste à une mesure directe du flux émis par une surface généralement émissive par le biais d'une caméra IR ou de monodétecteurs IR. Ces deux méthodes sont limitées par la mesure réalisée à la surface de l'échantillon.

L'idée ici est de coupler ces deux méthodes afin d'obtenir un système de mesure 3D de champ de températures. Pour cela, les sources habituelles sont remplacées par des sources lointain IR (source THz) et le système de détection est assuré par un convertisseur THz-IR

[13-14]. D'un point de vue global, grâce à notre système de conversion multispectral, il est possible d'utiliser n'importe quel type de source. En pratique, l'utilisation d'une source THz présente un grand intérêt car ce type de longueurs d'onde traverse de nombreux types de matériaux diélectriques comme par exemple les plastiques et polymères. Cela permet, dans des cas où les matériaux sont opaques au visible ou à l'IR de venir réaliser une mesure de température dans le volume. Depuis peu, l'imagerie et la tomographie THz a pu être démontrée [15]. Cette onde a la particularité d'être non ionisante comparé aux rayons X et tout aussi pénétrante selon les matériaux. En revanche, elle possède de grandes longueurs d'ondes allant de 100 μm à plusieurs mm, ce qui est un désavantage en termes de résolution spatiale.

L'idée ici est d'utiliser la forte pénétration de ce type d'onde en réalisant des méthodes de thermoréflexivité avec sources THz afin de mesurer des champs de températures au sein de matériau généralement opaques aux techniques classiques. De plus, on montrera également, que l'utilisation de telles longueurs d'onde permet d'augmenter la sensibilité de ce type de mesure d'un facteur environ 70. Prenons ici l'exemple d'un matériau de type Téflon avec un insert métallique chauffant à l'intérieur, il est à ce jour impossible de mesurer la température au sein de ce type de matériaux autrement que par des méthodes intrusives de type thermocouple. De plus, la mesure à la surface est extrêmement longue compte tenu des propriétés thermiques (plutôt isolant). En effet, pour un insert placé à seulement 2 cm de la surface, il va falloir attendre environ 4000 s (avec diffusivité égale à $10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$) pour « voir » la chaleur à la surface. En revanche avec notre technique il devient possible de mesurer directement l'évolution de la température de l'insert. Cela ouvre de nouvelles perspectives importantes et intéressantes dans le domaine de l'étude des transferts de chaleur.

Dans ce papier, le principe de la méthode de mesure via capteur ponctuel sera présenté, puis une validation sur un matériau semiconducteur sera réalisée. Cela permettra de fournir une première courbe de calibration et de sensibilité du système de mesure. Ensuite, une première tomographie d'un plan de température sera présentée sur un matériau de type téflon chauffé volumiquement par une mine de graphite.

2. Principe de la méthode de mesure

Le système développé voir figure 1 permet une mesure en transmission et en réflexion. Pour cela, une source THz continue de type diode Gunn ($P = 20 \text{ mW}$ et $\lambda = 3 \text{ mm}$) est utilisée. Le faisceau est collimaté en sortie par le biais d'un miroir parabolique ($f = 120 \text{ mm}$). Ce faisceau monochromatique collimaté est ensuite envoyé dans une lame séparatrice (substrat de verre). Le faisceau transmis est focalisé dans le matériau à caractériser via une lentille en Téflon ($f = 60 \text{ mm}$). La partie réfléchi du faisceau est renvoyée via la première lame séparatrice vers un monodétecteur THz basé sur le principe de thermoconversion [14]. La partie transmise du faisceau focalisé est quand à elle envoyée sur un deuxième système de monodétection. Pour ce faire, le faisceau plan objet est réimagé du le capteur par le biais d'une autre lentille en Téflon ($f = 60 \text{ mm}$) et d'un autre miroir parabolique ($f = 120 \text{ mm}$). Afin de s'affranchir des pertes thermiques et pour obtenir un rapport signal à bruit convenable le faisceau incident est modulé par le biais d'un chopper mécanique. L'ensemble des signaux (incidents) et mesurés par les monodétecteurs est envoyé dans une détection synchrone qui va permettre d'obtenir la variation d'amplitude et de déphasage par rapport à la référence qui est donnée par le chopper mécanique. Ici, seule l'amplitude sera retenue.

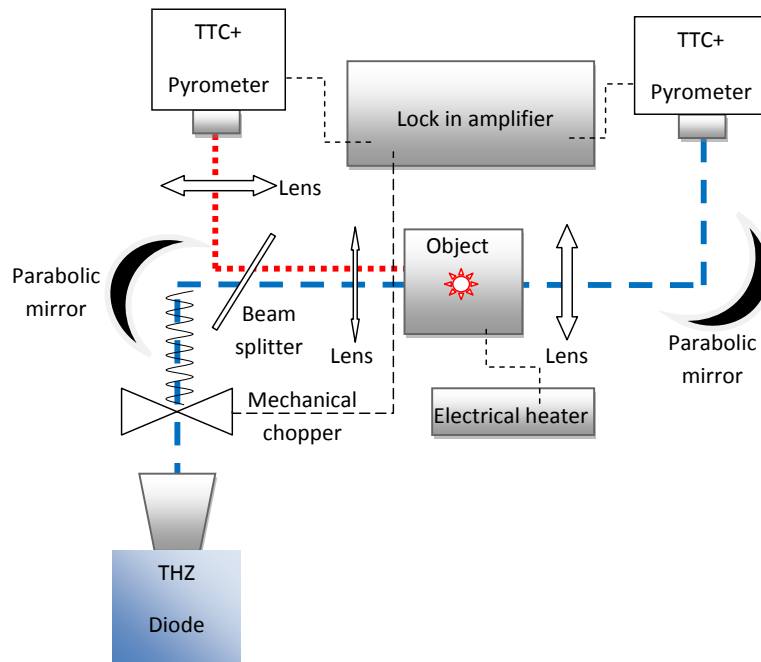


Figure 1 : Schéma de principe du système de mesure

Ainsi et comme il a déjà été démontré [3], la variation d'amplitude mesurée est proportionnelle à la variation du coefficient de réflectivité ou transmittivité avec une variation de température selon l'équation suivante :

$$\frac{R(T)-R(T_0)}{R(T_0)} = \frac{\partial R(T)}{R(T_0) \partial T} (T-T_0) = \kappa (T-T_0) \quad (1)$$

3. Validation de la méthode

Afin de valider la méthode de mesure, l'exemple suivant est proposé. A l'endroit de l'objet, voir figure 1, sont placés un bloc de Téflon ($e = 10$ cm) avec une lame de silicium ($e = 250$ μ m) équipée d'un système de chauffage par effet Joule (de type résistance Minco) et d'un thermocouple (de type K) pour mesurer l'évolution transitoire de la température du substrat. Ensuite, la résistance électrique est alimentée sous forme de créneau par le biais d'une alimentation stabilisée pilotable en tension. Une série de 4 puissances électriques est réalisée voir figure 2a et 2b. L'évolution de la température mesurée par le thermocouple et celle mesurée en réflexion par notre système de mesure sont enregistrées.

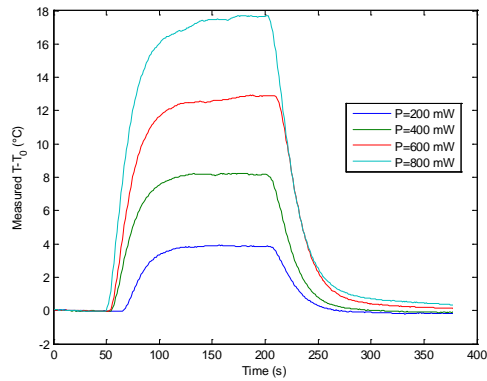


Figure 2.a : Evolution de la température relative mesurée par le thermocouple situé à la surface d'une lame de silicium

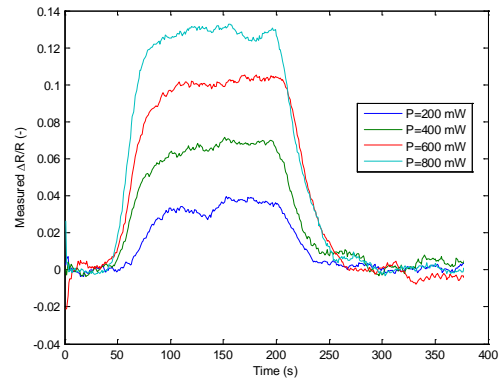


Figure 2.b : Evolution de l'amplitude relative mesurée par photorélectivité THz à la surface d'une lame de silicium et à travers un bloc de 10 cm de Teflon

Ensuite, au regard de l'équation 1, le coefficient κ traduisant la variation de température relative à celle de la réflectivité peut être estimé en minimisant les variations relatives d'amplitude obtenue en régime permanent avec celles obtenues par le thermocouple dans les mêmes conditions.

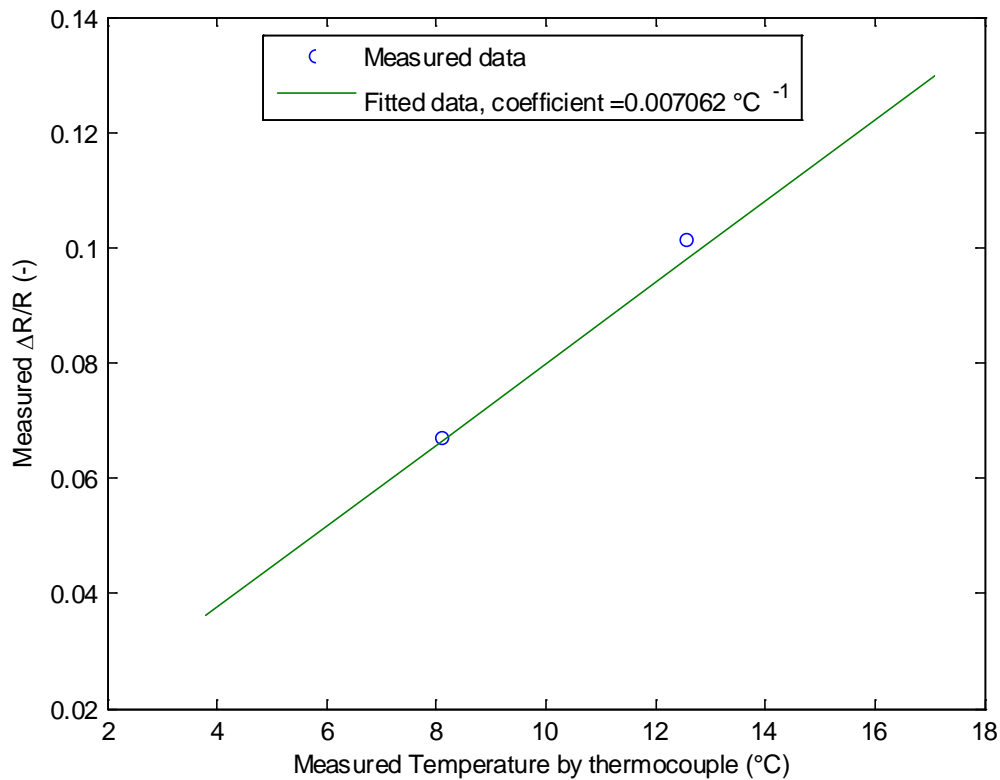


Figure 3 : Détermination du coefficient κ pour un substrat de silicium

La valeur obtenue $\kappa = 7.10^{-3} \text{ K}^{-1}$ va permettre une mesure quantitative la température du système. Il est intéressant de noter que sur des mesures réalisées en photo réflectivité visible [3] les valeurs du coefficient obtenu sont de 10^{-4} K^{-1} ce qui démontre la super sensibilité due à l'utilisation d'une onde THz plutôt que visible. Des travaux en cours devraient permettre d'expliquer ce phénomène.

Ainsi, dans cet exemple de validation réalisé sur un substrat chauffé de Silicium au travers d'un bloc de 10 cm de Téflon, on a pu démontrer d'une part la possibilité qu'offre notre technique de réaliser des mesures de température à travers des objets opaques au visible ou à l'IR. De plus, la détermination du coefficient κ de calibration pour ce matériau permet également de démontrer qu'une mesure absolue de température peut être réalisée et enfin, on a démontré que l'utilisation de grandes longueurs d'onde améliore également la sensibilité de la mesure de variation de température par photo réflectivité.

4. Premières mesures d'un champ 3D de température

Dans cette partie, un premier test de mesure d'un champ volumique de température est présenté. Pour cela, voir figure 4, un crayon en papier constitué d'une mine en graphite et d'une enveloppe en bois est inséré dans un matériau de type mousse isolante. L'ensemble est placé sur un système de rotation qui va nous permettre une mesure à différentes positions angulaires. La mine de graphite est quand à elle alimentée électriquement avec une excitation de type créneau.

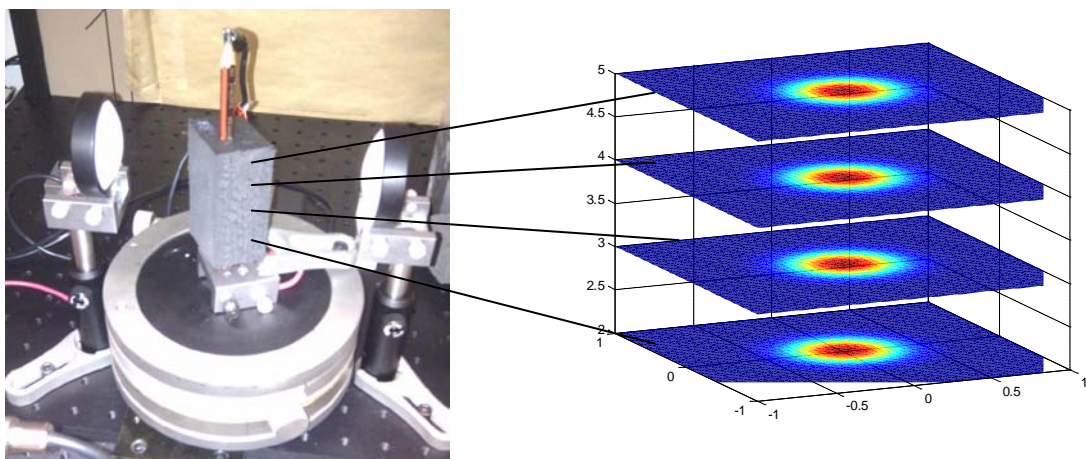


Figure 4 : Photographie du système mine de graphite, bois et mousse et plan thermique à mesurer

Compte tenu du caractère très transparent de la mousse aux ondes THz, la mesure est ici réalisée en transmission. Le but ici est de réaliser une mesure d'un plan perpendiculaire à la mine de graphite voir figure 4 à deux instants donnés et pour différentes hauteurs z . Ici, seul un plan sera mesuré compte tenu du caractère très isolant de ce type de matériaux, la mesure prend un temps très important. En effet, la procédure de mesure est basée sur les méthodes de transformée de Radon [x]. Ainsi, pour réaliser un plan, il faut effectuer une mesure ponctuelle à différentes positions le long d'une ligne perpendiculaire au graphite (ici on a choisit 40 mesures avec déplacement de 1 mm entre chacune) et cela pour 18 positions angulaires. Cela représente 720 positions angulo-spatiales. Ensuite, 2 images contenant ces 720 positions sont réalisées, la première à température ambiante et la seconde après 20 minutes de chauffage en continu de la mine de crayon. En effet, compte tenu des propriétés thermiques de la mousse,

après 20 mn la chaleur a diffusé dans le plan d'environ 1 cm. Cela permet d'obtenir les sinogrammes relatifs aux coefficients de transmission à T et T0, voir figure 5.a et 5.b.

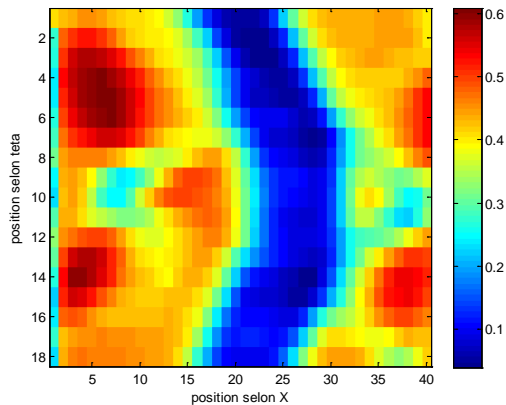


Figure 5.a : Sinogramme obtenu au sein de la mousse à la température ambiante

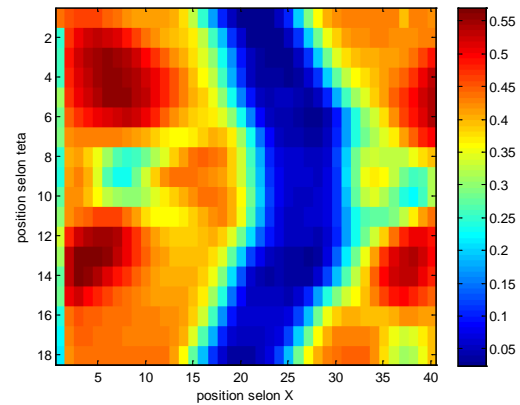


Figure 5.b : Sinogramme obtenu au sein de la mousse après 20 mn de chauffage

A partir de ces cartographies, la variation relative $(T-T_0)/T_0$ est calculée, puis une transformée inverse de Radon est appliquée à la résultante. Finalement, l'image obtenue, qui traduit le champ de température mesuré perpendiculairement au chauffage est interpolée pour palier aux problèmes de résolution spatiale. Cela permet d'obtenir, figure 6 le champ de température.

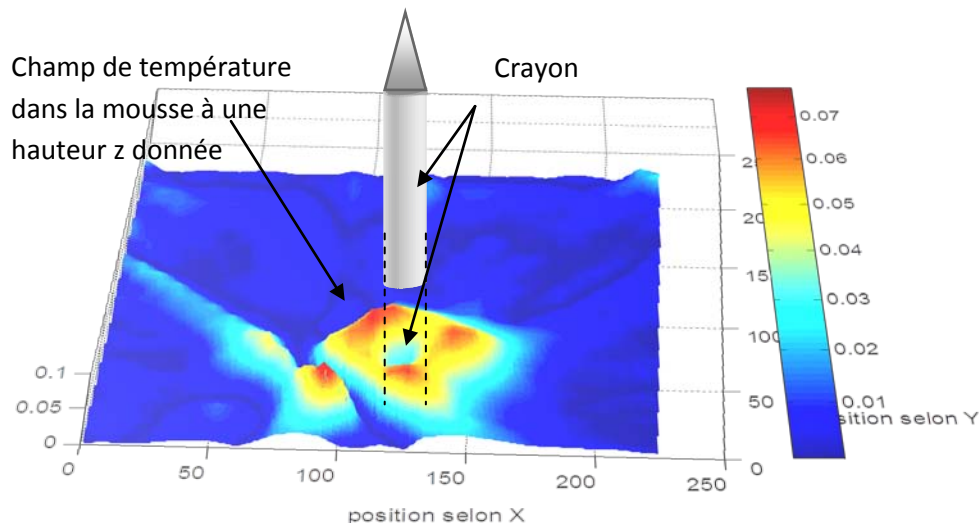


Figure 6 : Champ de température mesuré puis interpolé obtenu dans le plan perpendiculaire du chauffage

Ce résultat, bien que très préliminaire, est extrêmement prometteur car il démontre la faisabilité de mesures volumiques de températures. Il est à noter que la valeur de température à l'endroit de la mine de graphite est quasiment nulle. Cela s'explique par le côté absorbant du graphite vis-à-vis de l'onde THz, ainsi en travaillant en transmission l'onde est totalement absorbée. Ensuite, on distingue nettement un gradient quasi uniforme autour du graphite, cela représente le champ de température dans le bois et enfin, on voit également l'effet de la diffusion dans la mousse qui vient progressivement éteindre le gradient. Il faut également

noter un autre point chaud qui apparaît. Il faut tout de même noter que lors du chauffage, une fissure est apparue dans la mousse, et c'est ce qui semble apparaître sur le champ. Ceci étant dit, il semblerait trop précoce de certifier cet effet et notamment son influence dans la reconstruction du champ par transformée de Radon. Ainsi, de nouvelles études sont prévues pour obtenir un cas plus modèle que l'on peut comparer avec des simulations théoriques.

5. Conclusion

En conclusion, nous avons présenté dans ce papier les premières mesures de température par photo réflectivité THz, nous avons montré qu'il était possible de réaliser des mesures absolues de températures par cette technique, cela en traversant des matériaux semi transparents aux ondes THz. De plus, une première mesure d'un champ de température volumique a été présentée. Même s'il faut encore rester prudent sur l'aspect complètement quantitatif de la mesure obtenue, il semble tout à fait pertinent d'imaginer en poursuivant les essais qu'une mesure par thermographie IR lointaine en profondeur des matériaux (tomographique) est entrain de voir le jour. Enfin, à terme, il est envisagé de remplacer les monocapteurs par des caméras THz (IR+thermoconvertisseur) équipées d'un système de conversion pour bénéficier pleinement des avantages de l'imagerie pour de telles tomographies 3D transitoires.

Références

- [1] J. Opsal, A. Rosencwaig, and D. L. Wilenborg, *Appl. Opt.* 22, 3169, 1983.
- [2] S. Grauby, B. C. Forget, S. Hole, D. Fournier, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 70, No. 9, 1999, p 3603-3608.
- [3] S. Dilhaire, S. Grauby and W. Claeys, *Applied Physics Letters*, **84** (2004), 822-824
- [4] G. Pernot, M. Stoffel, I. Savic, F. Pezzoli, P. Chen, G. Savelli, A. Jacquot, J. Schumann, U. Denker, I. Mönch, Ch. Deneke, O. G. Schmidt, J. M. Rampnoux, S. Wang, M. Plissonnier, A. Rastelli, S. Dilhaire & N. Mingo, *Nature Materials* 9 , 491–495 (2010).
- [5] D. Rochais, H. Le Houëdec, F. Enguehard, J. Jumel and F. Lepoutre, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 (2005) 1498–1503.
- [6] Rosencwaig A, Busse G. High resolution photoacoustic thermal wave microscopy. *Appl Phys Lett* 1980;36:725–7.
- [7] Balageas D.L., Krapez J.-C., Cielo P., Pulsed photothermal modeling of layered materials, *J. Appl. Phys.* 59 (2) (1986) 348-357.
- [8] D.L. Balageas, A.A. Deem, D.M. Boshier, Characterization and nondestructive testing of carbon-epoxy composites by a pulse photothermal method, *Mater. Eval.* 45 (4) 461-465.
- [9] G. Busse, D. Wu, W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography ", *J. Appl. Phys.* Vol. 71 (8), p3962-3965, 1992.
- [10] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography. *J Appl Phys* 1996; 79(5):2694–8.
- [11] G.M. Giovanni, C. Meola, *NDT&E International* 35 (2002) 559–565.
- [12] L. Clerjaud, C. Pradere, J. C. Batsale, S. Dilhaire, "Heterodyne method with an infrared camera for the thermal diffusivity estimation with periodic local heating in large range of frequencies (25 Hz to upper than 1 kHz)", *Quantitative InfraRed Thermography*, ISSN: 1768-6733, vol 7, n°1, pp 115-128, 2010.

- [13] C. Pradere, J.P. Caumes, D. Balageas, S. Salort, E. Abraham, B. Chassagne, J.C. Batsale, (2010), "*Photothermal converters for quantitative 2D and 3D real-time TeraHertz imaging*", Quantitative InfraRed Thermography, ISSN: 1768-6733, vol 7, n°2, pp 217-235.
- [14] C. Pradere, J.C. Batsale. J.P. Caumes, B. Chassagne, *Imagerie tera-hertz à convertisseur infrarouge perfectionné*, Dépositant(s) CNRS [FR], N° Dépôt/publication 0952097, 01-04-2009.
- [15] M. Bessou, B. Chassagne, J.-P Caumes, C. Pradere, P.Maire, M. Tondusson, E. Abraham, (2012), "*Three-dimensional terahertz computed tomography of human bones*", Applied optics, ISSN: 0003-6935, vol 51, n°28, pp. 6738-6744.
- [16] Kak, A. C., and M. Slaney, Principles of Computerized Tomographic Imaging, New York, NY, IEEE Press, 1988.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'ANR pour le financement de ces travaux de recherche.